

4%Si-Fe単結晶の動的磁壁移動に関する研究

著者	宮原 鐵洲
号	583
発行年	1981
URL	http://hdl.handle.net/10097/11532

氏 名	みや はら てつ しゅう 宮 原 鐵 洲
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 56 年 11 月 11 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 42 年 3 月 東北大学工学部応用物理学科卒業
学 位 論 文 題 目	4 % Si - Fe 単結晶の動的磁壁移動に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 高橋 実 東北大学教授 池田 拓郎 東北大学教授 穴山 武 東北大学教授 津屋 昇 東北大学教授 小島 浩

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

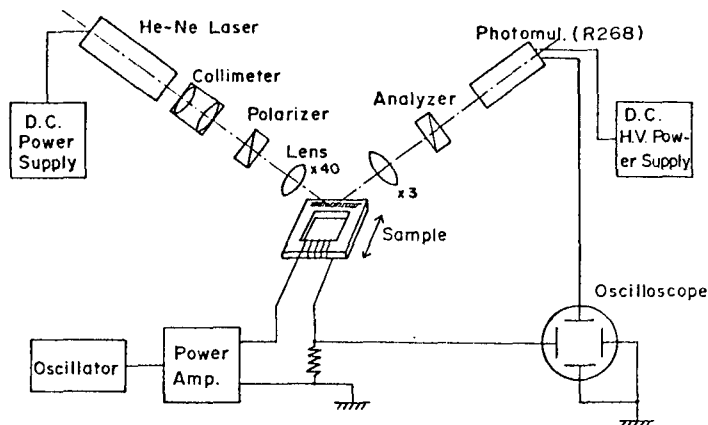
1950年, Williams らによって硅素鋼の交流磁化損失に磁壁の運動が関与すると指摘されて以来, 実用上の観点から磁壁の動的移動に関する研究が, 交流磁化損失の機構解明と関連づけて発展してきた。その結果, 1967年にはHouze により磁気-光カー効果を利用した高速度写真法が開発され, 磁区模様の変動的変化の様子が直接観察され, 交流磁化損失の原因として磁壁運動の非一様性, 駆動磁界およびその周波数による磁壁数の変化, 板厚方向の磁壁の彎曲効果等が指摘された。しかしながら, 高速度写真法では周波数が高くなると磁壁の移動距離の測定精度が低下するため, 磁壁運動および損失の周波数依存性は商用周波数付近の狭い範囲に限られた。また, 用いた試料は(110)[001]方位をもった短冊状の硅素鋼板のため, 磁壁は板面の法線に対して上32°の方向に平行に存在する。従って, 交流磁界駆動下の試料内部における磁壁の形状変化が複雑となる。また, 短冊状試料では反磁界効果により, 試料端にスパイク状逆磁区が発生し, その磁区の生長が磁化過程に寄与するため, 磁壁運動と損失との関係を理論的に解析することが困難であった。本研究では単純な磁区構造をもつ棒型(100)[001]4%Si-Fe単結晶について磁気-光カー効果法を用い, 0~5kHzの周波数範囲の駆動磁界下における磁壁の局所的な移動距離および表面磁化特性の測定を行うとともにブリッジ法による体積磁化特性の測定を行い,

両者の結果を比較検討し、磁壁運動の様子と交流磁化の損失機構を明らかにすることを目的とした。

第2章 試料作製法並びに動的磁化測定法

まず、ブリッジマン法で作製した4% Si-Fe単結晶塊からほぼ板面が(100)面の板を切出し、粉末図法形で磁区模様を観察しながら面補正研磨を行った後、放電加工法によって枠型試料(外枠: 12.9×12.7 mm, 内枠: 8.3×8.3 mm, 厚さ: 0.55 mm)の各辺が180°磁壁に平行となるように整形した。次いで、

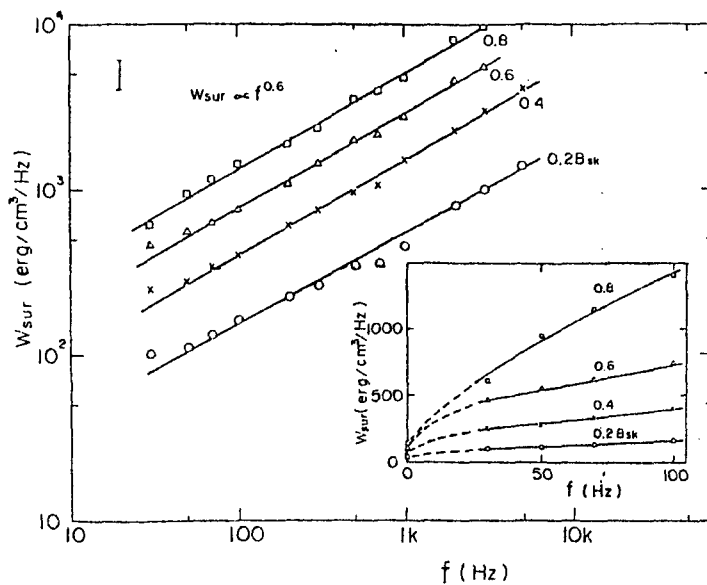
真空中で1,100℃, 10時間の歪みとり焼鈍を行い試料とした。次に、0~5 kHzの周波数範囲の正弦波交流磁界下の磁区模様の観察、磁壁移動距離および表面磁化特性を調べるため第1図に示すようなレーザー光を用いたカー効果磁化履歴曲線測定装置を新たに試作した。一方、体積磁化特性および損失の測定にはマックスウェルブリッジ法を用いた。



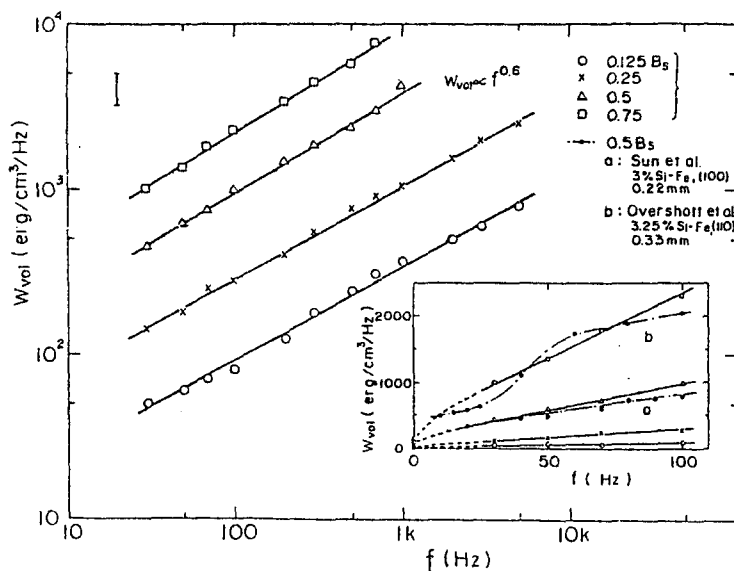
第1図 磁気-光カー効果磁化履歴曲線測定装置のブロックダイアグラム

第3章 表面および体積磁化特性

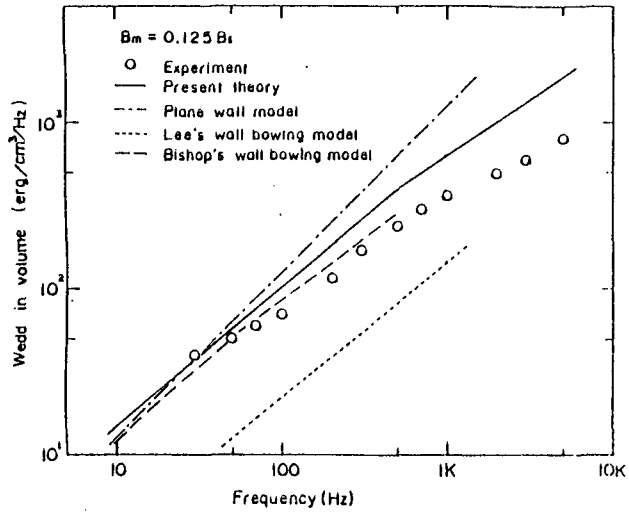
まず、顕微鏡写真法により、交流磁界駆動下の試料表面全体の磁区模様の変化を観測しながら表面磁化の動特性を求めた。次いで、ブリッジ法により体積磁化特性を測定し、両者の結果を比較検討した。その結果、0~5 kHzの周波数域で、磁化は磁壁の並進運動によることを見出した。また、第2図(a), (b)に示すように、試料表面の磁化損失および体積磁化損失はともに、一定の表面磁束密度および体積磁束密度のもとで周波数に対して約 $f^{0.6}$ に比例して増大し、異常渦電流損失の特徴である非直線性を示す。さらに、交流体積磁化損失から直流磁化損失を差引いて求めた渦電流損失の周波数依存性は第3図にみるように約500 Hz以下の周波数範囲で Bishop の彎曲磁壁渦電流理論による計算値とよい一致を示すが、磁壁の彎曲の大きさに対応する(表面磁束密度)/(体積磁束密度)は第4図にみるように、Bishop の理論値より1.5~3倍小さい値を示す。



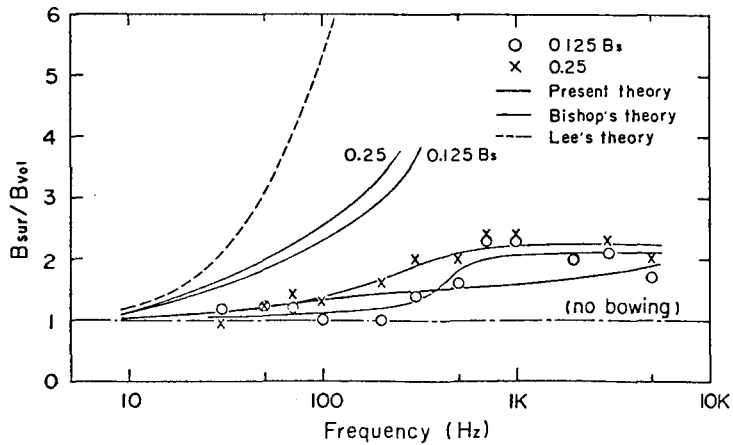
第2-(a)図 一定の表面磁束密度下の表面における損失 W_{sur} の周波数依存性(内挿図は商用周波数付近を直線目盛で示してある)。



第2-(b)図 一定の体積磁束密度下の体積磁化損失 W_{vol} の周波数依存性(内挿図は商用周波数付近を直線目盛で示してある)。



第3図 渦電流損失の周波数依存性

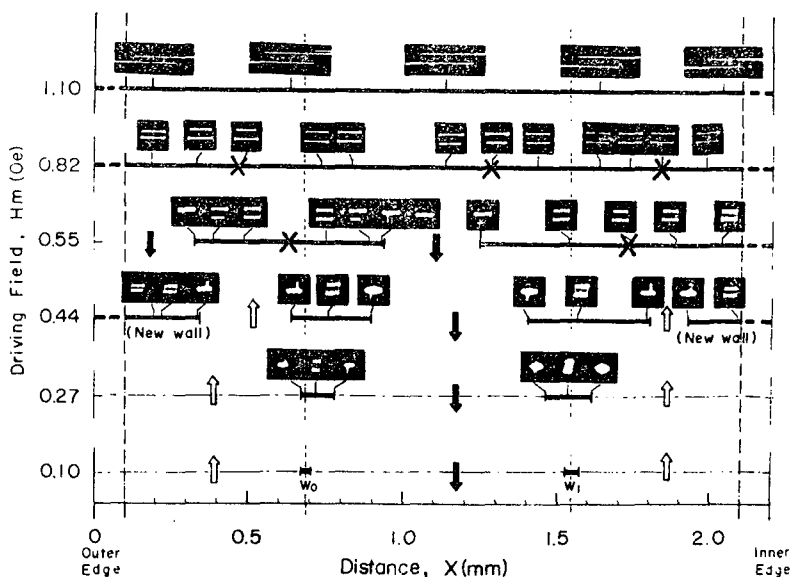


第4図 B_{sur}/B_{vol} の周波数依存性

第4章 局所磁化特性および磁壁の動的挙動

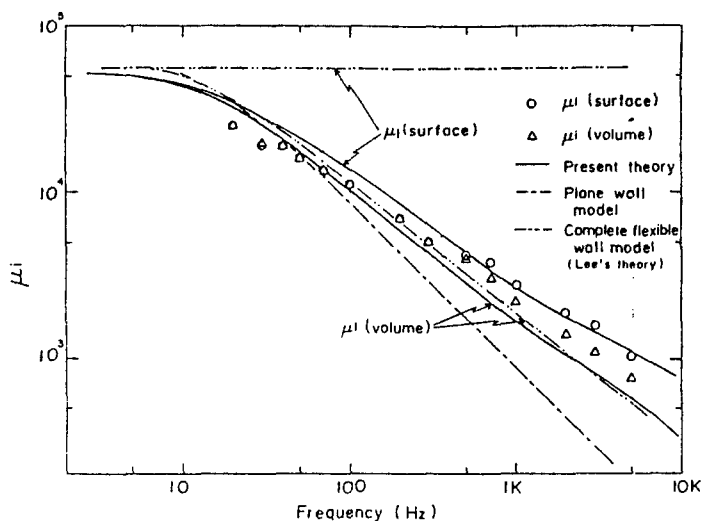
個々の磁壁の移動距離、磁壁の接合現象および局所磁化特性等を調べるために、径約 $5\ \mu\text{m}$ のスポットのレーザー光を試料面に照射し、第5図に示すように駆動磁界および試料位置を僅かずつ変化させながら、局所磁化履歴曲線および磁壁振動幅の測定を行った。その結果、個々の磁壁の振動中心は駆動磁界の増加とともに外枠側または内枠側へシフトするが、磁壁振動幅の駆動磁界依存性および周波数依存性は同様の振舞をする。また、駆動磁界の増加とともに、各磁壁は内

枠側から順次接合して
 いくが、接合後も夫々
 独立に運動し、接合点
 (図中×印)で台形状
 の特異なループを示す
 ことが見出された。磁
 壁数の増加は試料端部
 からおこり、30 Hz ~
 5 kHzの周波数範囲で
 1 ~ 3であった。孤立
 した180°磁壁の初透
 磁率の周波数依存性は
 第6図に示すように、
 磁壁が完全に硬いとし
 たモデル(平板磁壁モ
 デル)と完全に柔かい
 としたモデルの中間的
 性質を示すことから、磁
 壁のスピ構造を考慮
 した磁壁運動を考える
 必要があることが判っ
 た。



第5図 レーザー光による局所磁化履歴曲線と磁壁移動範囲
 (駆動周波数 200 Hz, — 磁壁の移動範囲)

孤立磁壁の振動中心では角型ループ、振動端では上向きまたは
 下向きスパイク状ループが生ずる。 $H_m = 0.44$ Oeで試料端に
 新しい磁壁が発生する。 $H_m = 0.55$ Oeでは磁壁の接合が生じ、
 接合点において台形状の特異なループを示す。 $H_m = 1.1$ Oeで
 は全領域で通常の角型ループとなる。



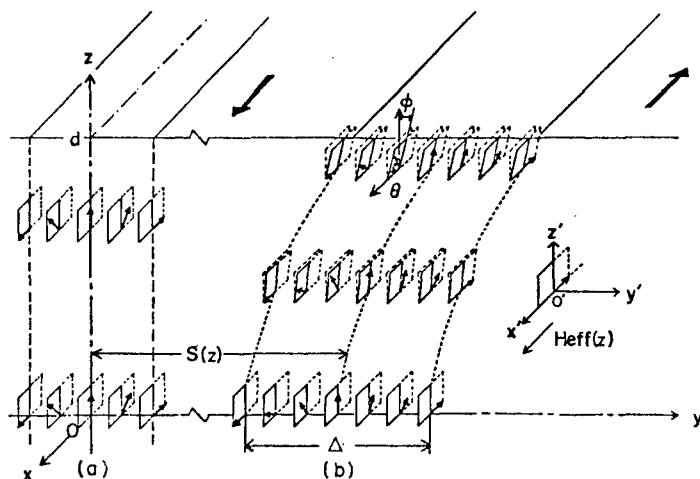
第6図 初透磁率の周波数依存性

第5章 動的磁壁移動に関する理論的考察

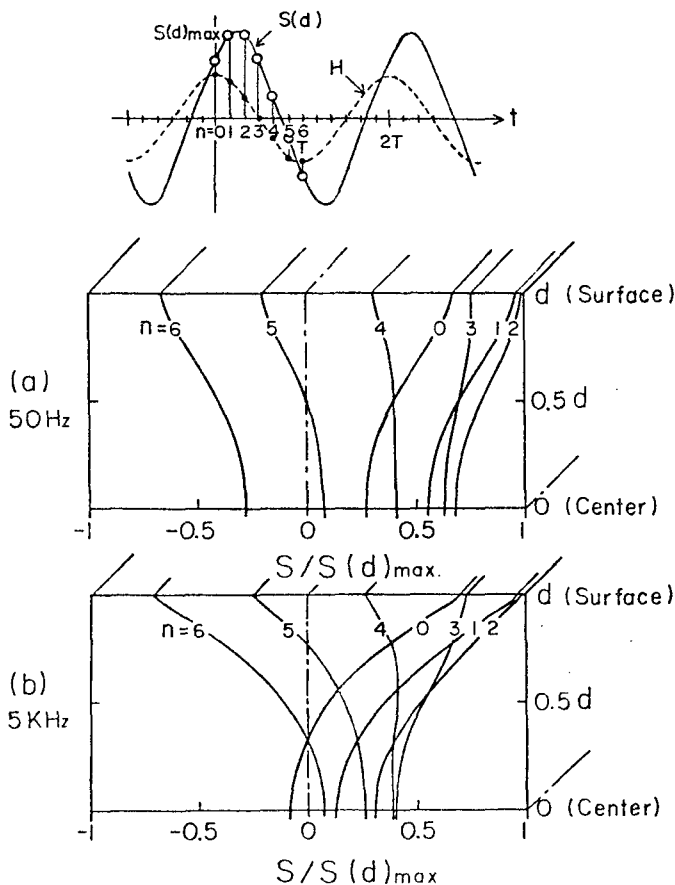
180°磁壁の運動について理論的解析を試みた。解析にあたっては第7図に示すような磁壁のスピンの構造モデルを立て、従来の2階微分方程式であらわされる磁壁の運動方程式に磁壁の曲がりによって生ずる交換エネルギー項を新たに導入し、以下のような運動方程式を得た。

$$I' \frac{\partial^2 S(z)}{\partial z^2} - m\ddot{S}(z) - \beta\dot{S}(z) - kS(z) = -2M_s H_{\text{eff}}(z) \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 $I' = 2A\pi^2/\Delta$, $m = 2(8 + \alpha^2\pi^2)M_s / (3K_1 + 8\pi M_s^2)\gamma^2\Delta$, $\beta = \alpha\pi^2 M_s / \gamma \Delta$, A は交換定数 (1.7×10^{-6} erg/cm), K_1 は結晶磁気異方性定数 (3.2×10^5 erg/cm³), M_s は飽和磁化 (1,400 Gauss), Δ は磁壁の幅 (1,000 Å), γ はジャイロ磁気定数 (1.76×10^7 Oe⁻¹ s⁻¹ cm⁻¹), α はギルバートの制動定数 (0.01), k は復元力係数 (1.4×10^4 erg/cm), $S(z)$ は板厚中心からの距離 z における磁壁移動距離, $H_{\text{eff}}(z)$ は試料内の有効磁界である。なお、境界条件としては試料表面で磁壁は自由であるとして電位ポテンシャルの手法を用いて解いた。その結果、試料内部における磁壁の定常状態の運動の様子は第8図のようになり、実験から求めた磁壁移動距離、渦電流損失 (第3図参照)、磁壁の彎曲の大きさ (第4図参照) および初透磁率 (第6図参照) の周波数依存性をよく説明することができた。



第7図 静止中(a)および運動中(b)の磁壁のスピンの構造モデル (試料断面図)
磁壁内スピンの x 軸に対する角度を θ , このスピンと x 軸を含む面と z 軸とのなす角度を $\phi(z)$ とする。磁壁の幅方向に対して $\phi(z)$ は一定であり, θ は磁壁内で y に関して1次関数的に変化するとする。



第 8 図 試料内部の磁壁の運動 (a) 50 Hz, (b) 5 KHz

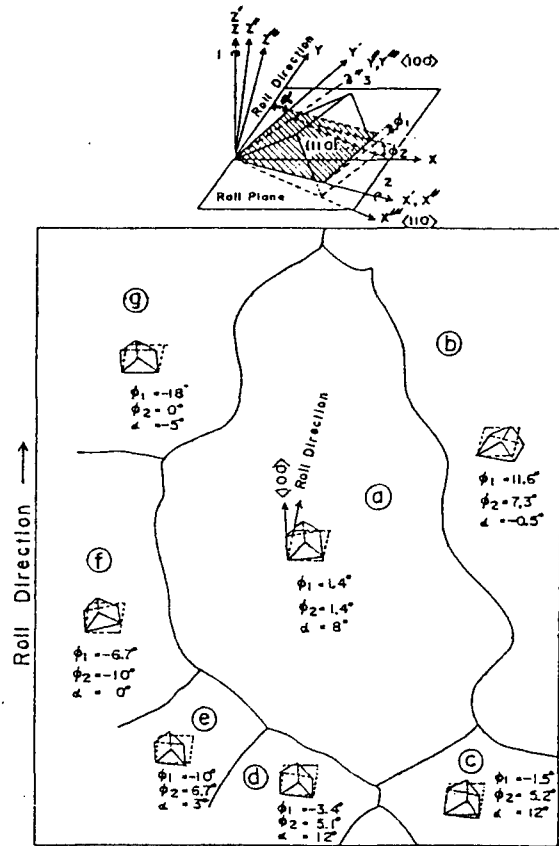
図は半周期 T を 6 等分した各位相における試料内部の磁壁の移動距離を示したものである。

($S(d)$: 試料表面における磁壁の移動距離, $S(d)_{\max}$: 同最大移動距離 $H = H_0 e^{j\omega t}$, $\omega t = n \cdot T/6$, $n = 0, 1, \dots, 6$,)

第 6 章 一方向性硅素鋼板の動的磁壁移動

第 9 図に示すような結晶粒配位をもった商用の一方向性硅素鋼板 (厚さ 0.27 mm) の板面が (110) [001] 配位の結晶粒内における磁壁移動の振舞を調べた。その結果, 40 Hz の交流磁界駆動下で結晶粒内の各磁壁は初透磁率磁化範囲で, ほぼ同じ移動幅を示すが, 磁界が大きくなると互いに異なる不均一な移動幅を示した。また, 磁壁はいずれも粒界でピンニングされず, むしろ粒界付近の移動幅が結晶粒内部のそれよりも大きくなる場合があること等が判った。このような振舞は隣接結晶粒の僅かな結晶面の方向配位の違いによる磁氣的相互作用によって生ずると考えられた。次に, 結晶粒内の磁壁の試料表面における初透磁率は第 10 図に示すように, 40 Hz で約 1,500 の

値を示し、500 Hzで約3,000と大きくなり、以後周波数の増加に対してほぼ一定となった。この振舞は前述の(100)[001]単結晶の振舞と異なるとともに、従来の渦電流理論では説明出来ない特異な現象である。また、初透磁率領域を越えた磁化領域における孤立磁壁の透磁率は周波数に対して約 $f^{-0.2}$ に比例して減少し、(100)[001]単結晶の場合と比較して著しく小さい周波数依存性を示した。これらの透磁率の周波数依存性は鋼板中の磁化容易軸が板面法線に対して $\pm 45^\circ$ の方向にあるために磁壁が非常に曲がりやすい性質をもつことに由来すると考えられた。

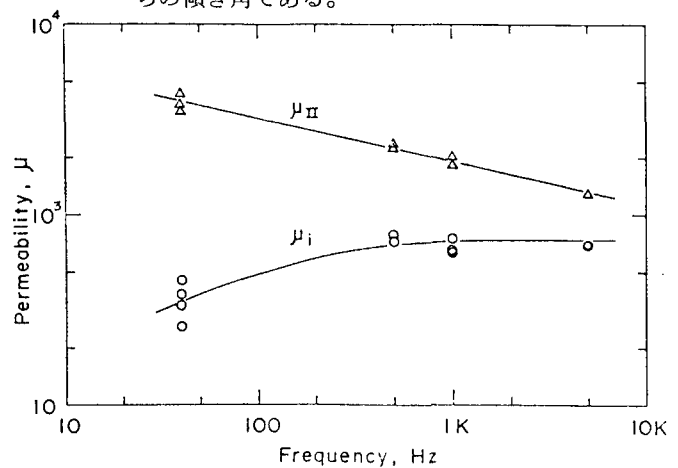


第9図 一方向性硅素鋼板試料の結晶粒配向

ϕ_1 は圧延方向を回転軸とした $\{110\}$ 面の試料表面に対する傾き角、 ϕ_2 は圧延方向に直角な方向を回転軸とした $\{110\}$ 面の試料表面に対する傾き角、 α は $\{110\}$ 面内における $\langle 110 \rangle$ 軸の圧延方向からの傾き角である。

第7章 総 括

各章で述べた主要な結果を要約してまとめた。



第10図 孤立磁壁の初透磁率 μ_I および初透磁率磁化領域を越えた磁化領域における透磁率 μ_{II} の周波数依存性

審 査 結 果 の 要 旨

硅素鋼の交流磁化損失の周波数依存性には磁壁の運動が支配的要因として関与すると考えられているが、その機構については実験的にも理論的にも未だ多くの問題が残されている。本論文は、磁区構造の簡単な4% Si-Fe 枠型(100)[001]単結晶を用い、0～5 kHzの交流磁界駆動下における表面磁壁の運動と体積磁化特性を精密かつ系統的に調べ、両者を比較検討することによって交流磁化損失と磁壁の動的挙動の関係を明らかにしたもので全編7章よりなる。

第1章は緒論であり、交流磁化損失の機構に関する研究の背景と本研究の意義について述べている。

第2章では、枠型(100)[001]単結晶試料の作製法、体積磁化測定法および新たに考案し試作した磁気-光カー効果法による精密な表面の磁壁移動距離の測定法と局所磁化特性測定装置について詳述している。ここで直径約5 μm の微小領域の磁化の測定を可能にし、磁壁移動距離をレーザー光のスポット内に磁壁が進入した瞬間の偏光面の回転を電気信号に変換して検出する方法を開発したことは磁気計測学上価値がある。

第3章では、写真法を用いて測定した試料表面の磁化特性と体積磁化損失の測定結果について述べている。ここで異常渦電流効果による磁壁の彎曲の大きさが、従来の渦電流理論から期待される値の1/2～2/3となること、損失の周波数依存性が磁壁の運動と密接な関係にあること等の結果を得ている。

第4章では、磁壁の移動距離、磁壁の接合現象および局所的な表面磁化特性について測定した結果を述べている。ここで、駆動磁界の増加による磁壁の振動中心の移動、磁壁数の増加の現象を見出し、磁壁の振動振幅の駆動磁界および周波数依存性には磁壁内のスピン構造を考慮する必要があることを明らかにした。

第5章では、交流磁界駆動下の定常状態における磁壁を彎曲状磁壁として、スピン間の交換エネルギーの項を新たに導入した運動方程式を導き、磁壁運動と交流磁化損失の周波数依存性を理論的に解析している。ここで磁壁内のスピン構造を考慮して渦電流効果による磁壁の運動を解析したことは磁気物性学上価値がある。

第6章では、一方向性硅素鋼板について同様の手法を用いて局所的な磁壁移動特性を調べた結果について述べている。ここで結晶粒界における磁壁のピンニングは、隣り合う結晶の(100)結晶面相互の傾き角に依存すること、結晶粒内の磁壁移動の周波数依存性は、単結晶の場合の周波数依存性と異なった特異な現象を示すことなど、実用上有用な知見を得ている。

第7章は総括である。

以上要するに、本論文は磁壁の動的な挙動を精密に調べ、交流磁化および交流磁化損失に関与する磁壁運動について種々の有用な知見を加えたもので磁気工学に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。